

Resumen

Este proyecto tiene como objetivo el análisis aerodinámico de los camiones de transporte internacional. Para realizar dicho estudio se utilizará software de simulación CFD o “Computational Fluid Dynamics”.

El objetivo final es la proposición de una mejora que pueda implementarse junto con las demás soluciones aerodinámicas disponibles actualmente.

El estudio se divide en diferentes partes, inicialmente se realizarán simulaciones de los vehículos sin los apéndices aerodinámicos que incorporan de serie. En esta fase el objetivo es comprender cuáles son las áreas problemáticas del diseño de los camiones para su posterior optimización.

La siguiente fase consiste en la simulación del conjunto cabeza tractora y caja pero esta vez incorporando los elementos aerodinámicos comúnmente utilizados. A raíz de los resultados se sacarán conclusiones sobre qué áreas no han sido explotadas todavía y el porqué de dicha situación.

Esto nos llevará al punto en el que se propondrán varias alternativas para la mejora de la eficiencia. En esta fase se observarán los pros y contras de cada una, así como la viabilidad de su implantación. Teniendo en cuenta las necesidades del mercado y los criterios de diseño críticos se escogerá una de las alternativas y se estudiará su impacto. Se acabará llegando a la conclusión de que la opción elegida es beneficiosa para el rendimiento aerodinámico del vehículo.

Al finalizar las tres fases presentadas se realizará una comparativa que permita ver la evolución de la aerodinámica en éste tipo de vehículos y por qué siguen dicha evolución.



Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. GLOSARIO	5
2. PREFACIO	6
2.1. Origen del proyecto.....	6
2.2. Motivación	6
3. INTRODUCCIÓN	7
3.1. Objetivos del proyecto.....	7
3.2. Alcance del proyecto.....	7
4. CONTEXTO ACTUAL	8
5. MARCO TEÓRICO	9
5.1. Dinámica de fluidos.....	9
5.2. Dinámica de fluidos computacional	12
6. METODOLOGÍA	13
6.1. Presentación del modelo base del estudio.....	14
6.2. Configuración de la simulación	15
6.2.1. Mallado	15
6.2.2. Modelo	17
6.2.3. Condiciones de contorno	17
6.2.4. Simulación	18
7. PRIMERA FASE	19
7.1. Resultados de la simulación	20
7.2. Análisis gráfico de la simulación	20
8. SEGUNDA FASE	27
8.1. Nuevo componente.....	27
8.2. Resultados de la simulación	27
8.3. Análisis gráfico de la simulación	29
9. TERCERA FASE	31
9.1. Introducción.....	31
9.2. Alternativas propuestas.....	31

9.2.1. Extensión del marco trasero	31
9.2.2. Techo del remolque en forma de gota.....	32
9.2.3. Desviador de flujo	33
9.3. Desarrollo de la alternativa seleccionada.....	34
9.4. Resultados de la simulación.....	38
9.5. Análisis gráfico de la simulación.....	39
10. SUMARIO DE LAS SIMULACIONES	42
10.1. Discusión de resultados	42
11. PRESUPUESTO	44
12. IMPACTO AMBIENTAL	46
BIBLIOGRAFÍA.....	48
Referencias bibliográficas	48
Bibliografía complementaria	49



1. Glosario

CFD: Computational Fluid Dynamics o dinámica de fluidos computacional

CD: Drag Coefficient

2-D: Dos dimensiones

3-D: Tres dimensiones

2. Prefacio

2.1. Origen del proyecto

Este proyecto nace con el objetivo de poner en práctica algunos de los conocimientos adquiridos durante el transcurso del grado, especialmente los que más interés despertaron. La idea de realizar un estudio aerodinámico de vehículos con diferentes soluciones para la mejora de los mismos se presentaba como una gran oportunidad para aprender más sobre este tema.

Dada esta convicción sólo era necesario saber cuál iba a ser el vehículo en cuestión. Fue aquí donde el hecho de haber realizado prácticas en la empresa IVECO con anterioridad hizo que finalmente se escogieran los camiones de transporte internacional como objeto de estudio. De esta forma se podría combinar lo aprendido en la universidad con lo aprendido en la empresa.

2.2. Motivación

La formación en el grado en Ingeniería Industrial ofrece una gran cantidad de conocimientos sobre diferentes ámbitos, desde la química, la mecánica y los materiales hasta el cálculo y el diseño en tres dimensiones. De todo este abanico de posibilidades el campo que más me atrajo fue la mecánica, en concreto, la mecánica de fluidos.

Debido a mi gran afición al automovilismo, siempre me ha interesado la aerodinámica. Al ver la cantidad de apéndices utilizados en competición siempre he pensado en la aerodinámica como un campo aún por explotar en vehículos preparados para la circulación por carretera. A pesar de haber realizado prácticas de simulación mediante CFD en la universidad, no tenía amplios conocimientos sobre este tema. Por ello este proyecto se vio como una oportunidad de mejorar y aprender así como un nuevo reto en el que, sin duda, surgirían problemas en su transcurso.

3. Introducción

3.1. Objetivos del proyecto

El proyecto se inicia contextualizando la problemática presentada y la necesidad de resolverla. Para encontrar soluciones se analizarán los tipos de fuerzas y principios físicos que afectan a los vehículos.

Una vez hecho esto se propondrá el modelo de estudio, en este caso un modelo en dos dimensiones (2-D). Se estudiará el comportamiento del flujo alrededor del cuerpo mediante simulaciones CFD y se realizarán mejoras graduales para tratar de mejorarlo.

Dichas mejoras se incorporarán en dos partes distintas. Una primera en la que se añadirán apéndices ampliamente extendidos en la actualidad y una segunda en la que se propondrán mejoras propias.

3.2. Alcance del proyecto

El objetivo de este proyecto es identificar las diferentes áreas críticas en el diseño de los vehículos y estudiar cómo las soluciones propuestas desvían el flujo de la forma deseada. Por tanto, queda fuera del alcance de este proyecto la necesidad del cumplimiento de normativas de seguridad y dimensionamiento del vehículo. De la misma forma no se realizará la elección del material con el cual fabricar los componentes ni se llevará a cabo un estudio de resistencia a los esfuerzos sometidos durante su utilización.

4. Contexto actual

Actualmente uno de los problemas más importantes para la industria del automóvil es la reducción del consumo de carburante. Esto, junto con la tendencia al alza del precio del combustible en los últimos años, crea la necesidad a las compañías de hacer productos cada vez más eficientes. Durante esta lucha por la reducción de los costes de utilización y emisiones, se mejoran diferentes áreas del vehículo como puede ser el rendimiento del propio motor, mejoras en la transmisión y mejoras aerodinámicas.

Según el estudio realizado por “*National Research Council Canada*”[1] los factores que afectan al consumo de los vehículos pesados durante su uso en autopista son los siguientes:

Fuente	Balance de potencia del motor
Tren de potencia	5-10%
Inercia, frenado, desnivel	0-5%
Resistencia de rodadura	30-40%
Cargas auxiliares	2-10%
Perdidas aerodinámicas	35-55%

Tabla 4.1 Factores que afectan al consumo de vehículos pesados.

Estos factores varían en función del vehículo y de su velocidad ya que efectos como la aerodinámica varían de una forma no lineal con la velocidad. Como ejemplo podemos ver que a 53 km/h, la potencia requerida para vencer la resistencia mecánica del vehículo es el doble de la necesaria para hacer lo propio con la aerodinámica. En cambio, si elevamos la velocidad hasta 100 km/h ésta situación se invierte, llegando a ser las pérdidas aerodinámicas casi el doble de las mecánicas [2].

Estos balances se han realizado suponiendo una carretera sin inclinación, que el vehículo circula a velocidad constante y que el flujo de aire se desplaza en la misma dirección y sentido opuesto al avance. A la vista de estos resultados, es evidente la importancia de la aerodinámica.

5. Marco teórico

5.1. Dinámica de fluidos

La dinámica de fluidos es la ciencia que estudia los fluidos en movimiento. Los fenómenos que ocurren pueden ser descritos por tres ecuaciones de conservación [3]:

1. Ecuación de la continuidad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (\text{Ec. 5.1.1})$$

Donde, ρ =densidad, t =tiempo,

Esta ecuación viene de suponer la continuidad de las funciones que dan la densidad y la velocidad para un supuesto volumen de control infinitesimal. Su resultado es el de la conservación de la masa dentro de dicho volumen. Esto implica que esta ecuación es válida con independencia de si el flujo es estacionario o transitorio, si es viscoso o no viscoso o si es compresible o incompresible. Por otra parte, la ecuación no admite la presencia de fuentes o sumideros dentro del elemento.

Para la realización de este trabajo se hace un supuesto que da lugar a una gran simplificación de la ecuación, este supuesto es asumir que el flujo es incompresible. Así las variaciones de densidad son despreciables y el resultado es el siguiente:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (\text{Ec. 5.1.2})$$

Donde \mathbf{V} =campo de velocidades.

Será válida para flujo incompresible, sea estacionario o no.

2. Ecuación de la cantidad de movimiento.

$$\rho \mathbf{g} - \nabla p + \nabla \tau_{ij} = \rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} \quad (\text{Ec. 5.1.3})$$

Donde g =campo gravitatorio, p =presión, τ_{ij} =tensor de esfuerzos viscosos, ρ = densidad

Esta ecuación se puede expresar en palabras de la siguiente forma:

La suma de la fuerza gravitatoria por unidad de volumen, la fuerza de presión por unidad de volumen y la fuerza viscosa por unidad de volumen será igual al producto de la densidad por la aceleración.

Aparentemente, se presenta como una ecuación breve y compacta pero nada más lejos de la realidad. La ecuación de la cantidad de movimiento es una ecuación vectorial cuyos componentes están formados por nueve términos cada uno. Parece coherente intentar buscar una simplificación para ésta.

Dicha simplificación viene dada, como en el caso anterior, de suponer el flujo incompresible. De esta forma llegamos a la ecuación diferencial de la cantidad de movimiento para un fluido newtoniano con densidad y viscosidad constantes:

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{Ec. 5.1.4})$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{\partial v}{\partial t} \quad (\text{Ec. 5.1.5})$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{\partial w}{\partial t} \quad (\text{Ec. 5.1.6})$$

Estas son las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos incompresibles.

3. Ecuación diferencial de la energía.

$$\rho \frac{d\hat{u}}{dt} + p(\nabla \cdot V) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (\text{Ec. 5.1.7})$$

Esta ecuación es válida para un fluido newtoniano bajo unas condiciones muy generales de flujo no estacionario, compresible, viscoso y conductor de calor. Normalmente esta ecuación debe utilizarse junto con las ecuaciones presentadas anteriormente y esto hace muy complejo su cálculo. Haciendo una serie de aproximaciones se reduce a la siguiente ecuación:

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = \lambda \nabla^2 T + \Phi \quad (\text{Ec. 5.1.8})$$

Donde se involucra tanto la temperatura como la velocidad.

Las ecuaciones de continuidad y la de cantidad de movimiento pueden resolverse independientemente de la ecuación de la energía. Además, si se asume la temperatura constante como es el caso de este proyecto, se puede prescindir de la ecuación de la energía.

Así pues, si utilizamos las ecuaciones de Navier-Stokes combinadas con la ecuación de la continuidad, obtendremos un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas. Aunque hay un número limitado de soluciones analíticas de las ecuaciones de Navier-Stokes, éstas se pueden discretizar. Es en este momento donde entra en juego la computación por ordenador para discretizar mediante mallas y simular el comportamiento del fluido. Esto se conoce como Mecánica de Fluidos Computacional y está adquiriendo una importancia creciente en la mecánica de fluidos.

5.2. Dinámica de fluidos computacional

También conocida como “Computational Fluids Dynamics” o su abreviatura “CFD”, la dinámica de fluidos computacional es un método numérico para computar la dinámica de los fluidos. Como resumen se podría decir que se trata de la discretización de un espacio en pequeñas celdas en las cuales el fluido es modelado y las ecuaciones son resueltas para cada una de ellas.

La mayoría de los fluidos computados trabajan en régimen turbulento, esto hace que haya cierta variedad de modelos cuando se requiere simular las turbulencias. De ese abanico de posibilidades el método más común es el “Reynolds-Averaged Navier-Stokes” (RANS). En estas ecuaciones se calculan las propiedades del fluido promediadas en el tiempo. Esta opción es la más utilizada ya que no demanda una gran capacidad al computador, haciéndola más accesible para aquellos que no dispongan de grandes recursos.

6. Metodología

Como se ha descrito con anterioridad, la forma de actuar se basará en la comparativa de dos fases respecto a una geometría “en verde” la cual carece de importantes mejoras aerodinámicas. Para la definición de la geometría se utilizará el software de dibujo AUTOCAD. En lo referente al mallado y simulación el programa utilizado será ANSYS 14.

La cabeza tractora es la del camión IVECO Stralis. Este camión es comúnmente utilizado en Europa para realizar transportes de larga distancia. Dicho modelo podía incluir elementos aerodinámicos como el deflector del techo y deflectores laterales.



Imagen 6.2 [4] IVECO Stralis Euro 5

6.1. Presentación del modelo base del estudio.

El modelo base es el resultado de adaptar y simplificar un modelo disponible en 2-D. Dichas simplificaciones tienen como objetivo compatibilizar la geometría para su estudio plano, evitando la obstrucción del flujo. Para ello se decidió estudiar una sección del vehículo que no contuviera las ruedas. En las siguientes imágenes se puede ver la transformación.

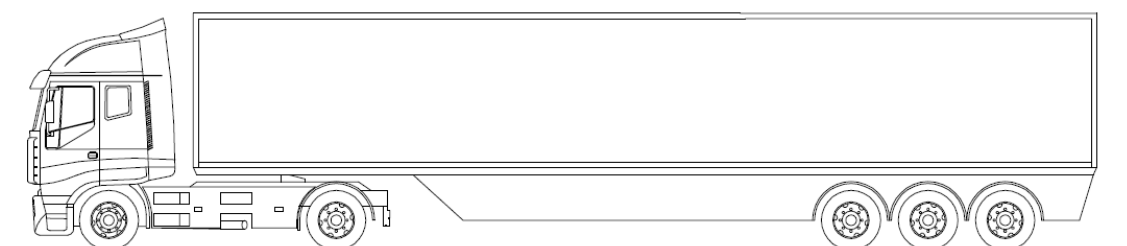


Figura 6.3 Geometría Autocad de IVECO Stralis Euro 5

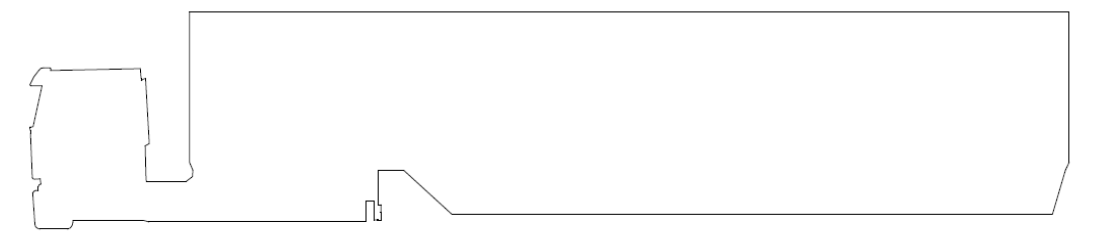


Figura 6.4 Geometría simplificada de IVECO Stralis Euro 5

Como se puede ver, esta simplificación va más allá y elimina algunos de los elementos aerodinámicos del vehículo. Esta sería la geometría utilizada para la fase 1 que era la encargada de mostrar la problemática en el diseño y será la referencia para el resto de simulaciones.

6.2. Configuración de la simulación

6.2.1. Mallado

El área a simular es rectangular con 110 metros de largo y 20 metros de alto. Aunque las dimensiones del camión son mucho más reducidas, es necesario tener un túnel de viento con dichas dimensiones. Esto es así para evitar que efectos como la estela o las zonas de alta presión que se generarán alrededor de la cabeza tractora afecten al flujo de aire incidente o salgan fuera del área a estudiar.

Para cada una de las fases se intenta hacer un mallado con características parecidas. Esto tiene como objetivo evitar que las diferencias en el mallado distorsionen los resultados ya que mallados más refinados presentan valores más favorables aerodinámicamente hablando [5].

El hecho de tener un área de trabajo de aproximadamente 2.200 metros cuadrados hace necesario un mallado por partes ya que no todas las zonas de la malla requieren la misma finura. Para el correcto dimensionado de la malla se divide la geometría inicial en 4 partes diferentes como podemos ver en la siguiente imagen:

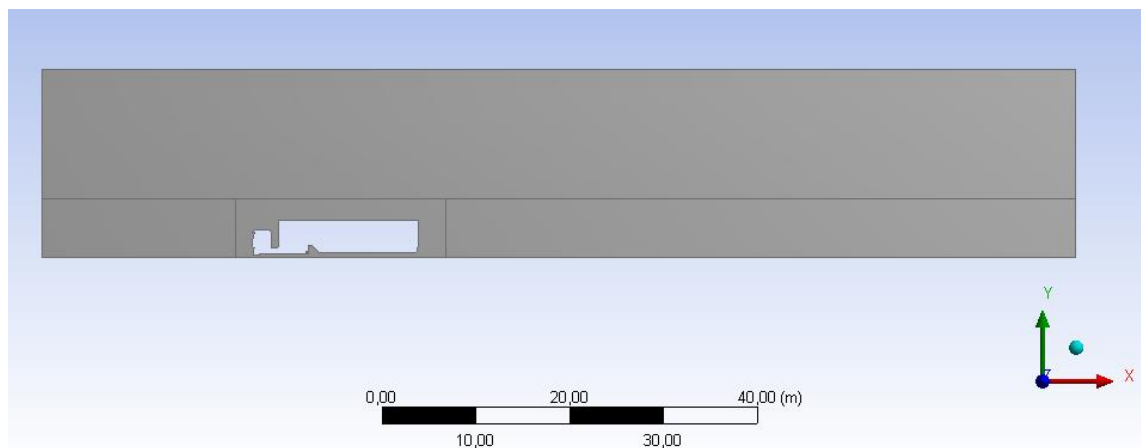


Figura 6.2.5.1 Vehículo y túnel de viento para simular

Esto nos da la posibilidad de mallar de forma independiente cada una de las partes, exigiendo así la calidad de mallado precisada por cada zona. Así la zona con más calidad y la más trabajada será el área que rodea al vehículo. Aun así será necesario utilizar otras herramientas de mallado para refinar las zonas más críticas como es el perímetro del

camión.

Con dicho propósito se utilizará el comando “inflation” [4] disponible en el asistente de mallado de Ansys. Esta opción permite refinar la malla en el contorno del vehículo. Detalles de lo explicado se pueden observar en las siguientes figuras.

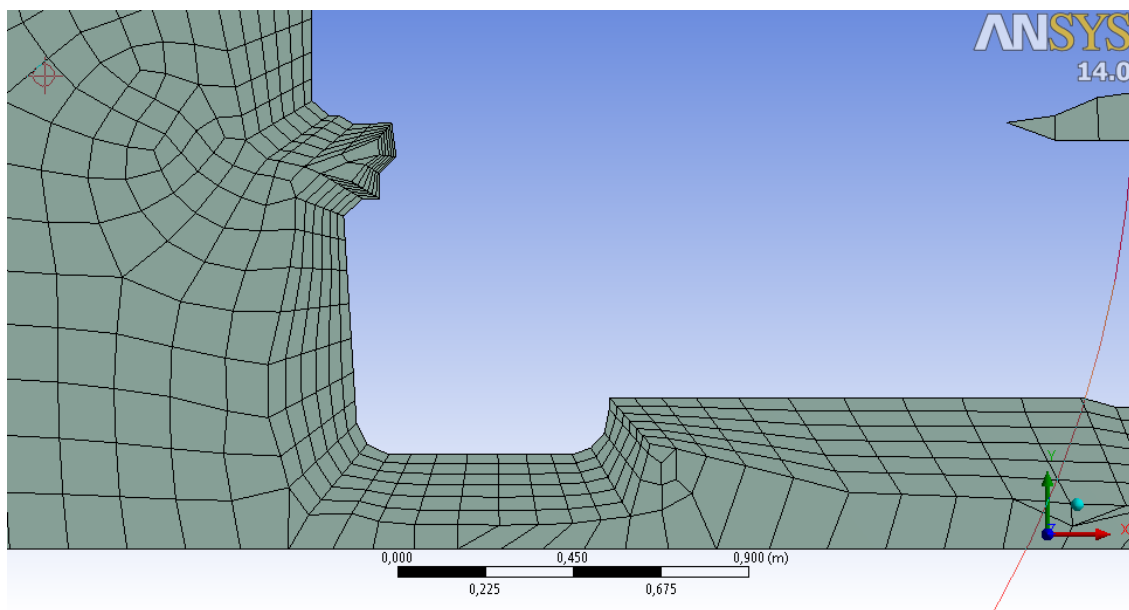


Figura 6.2.1.2 Resultado de la utilización del comando “inflation” en Ansys

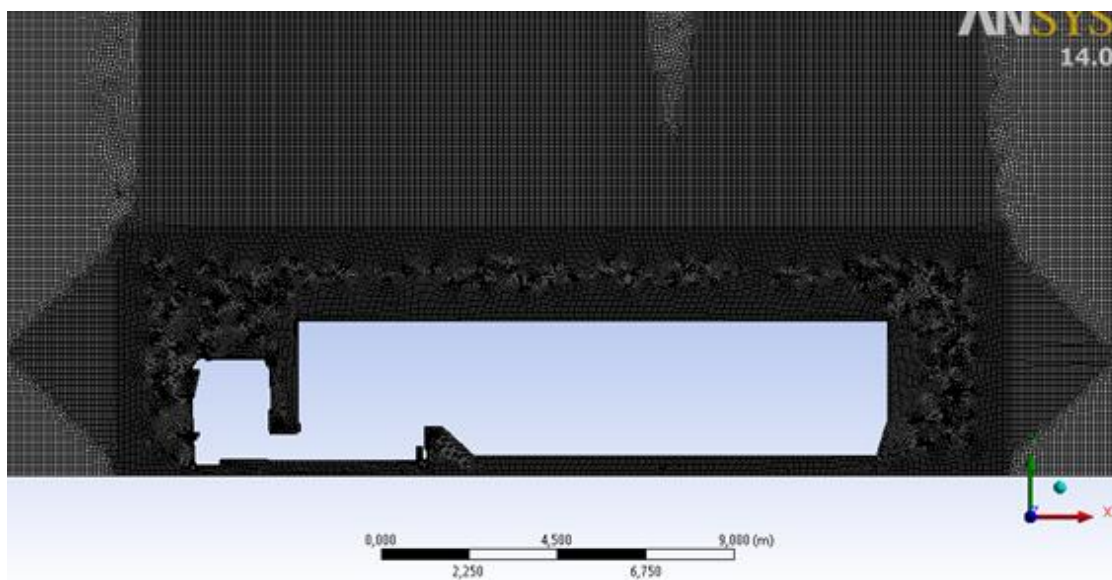


Figura 6.2.1.3 Mallado del modelo de referencia

6.2.2. Modelo

La definición de la simulación se ha realizado según los siguientes parámetros.

- Espacio: Dos dimensiones
- Tiempo: Estacionario
- Tipo: Basado en las presiones
- Formulación de la velocidad: Velocidad absoluta
- Modelo: SST k-omega (dos ecuaciones)
- Fluido: Aire a presión atmosférica

6.2.3. Condiciones de contorno

La mayoría del tiempo que un camión de estas características está circulando lo hace en una autopista a velocidades cercanas o iguales a 100 km/h [6], que es su velocidad máxima limitada. El objetivo será reproducir esta situación en el túnel de viento para optimizar el rendimiento del vehículo en condiciones normales de uso.

Para recrear estas condiciones se definen diferentes zonas del túnel: inlet, outlet, wall, moving-wall y wall-surface_body. Se pueden identificar en la siguiente figura.

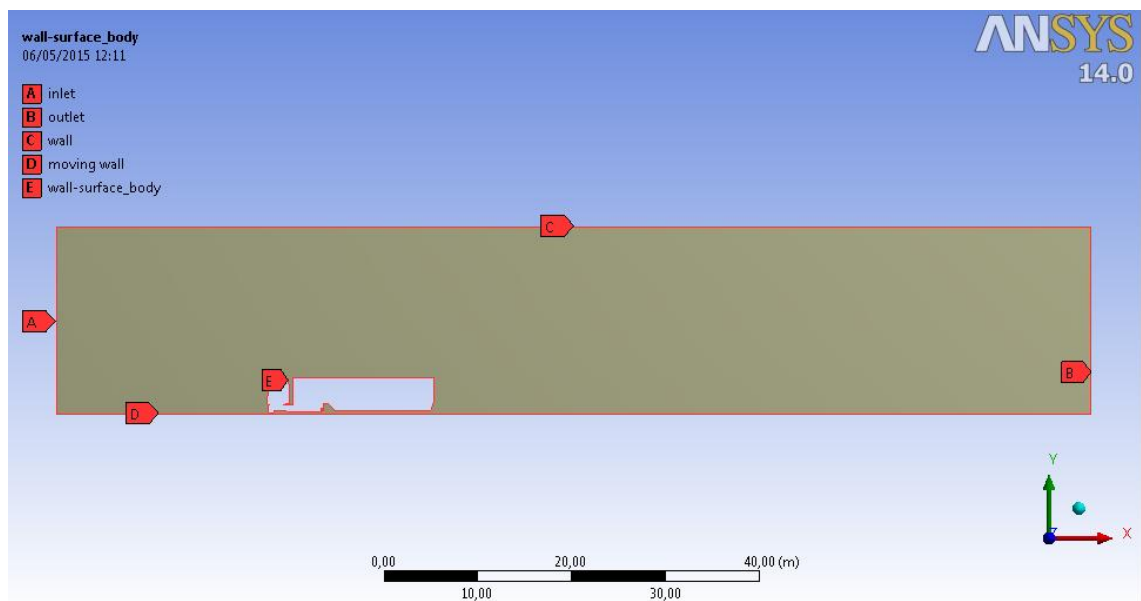


Figura 6.2.3.1 Diferentes zonas del túnel de viento.

Las características de cada una de éstas son:

- A. Inlet: Entrada de velocidad, se define la velocidad del fluido, en este caso aire. La velocidad de entrada es de 27,78 m/s simulando así la velocidad de crucero de los vehículos
- B. Outlet: El aire evacuará por esta parte, la presión manométrica de salida será igual a 0 Pa ya que todo el túnel está a presión atmosférica.
- C. Wall: La parte superior del túnel se define como una pared estacionaria.
- D. Moving-wall: En esta zona se simula la carretera que, vista desde el camión, tiene una velocidad relativa de 27,78 m/s en la misma dirección y sentido al aire de entrada.
- E. Wall-surface_body: Esta es la forma del camión, en esta parte el flujo chocará y se desviará alrededor del cuerpo. Por ello, se define como una pared estacionaria.

6.2.4. Simulación

Las simulaciones se realizarán con Ansys Fluent. Para cada una de las fases se programarán 5.000 iteraciones, se monitorizarán los residuos para comprobar la convergencia de la solución.

7. Primera fase

Para esta primera fase se utilizará la cabeza tractora básica, ésta es sin la utilización del deflector frontal. Así se recogerán datos de partida con los que comparar las diferentes soluciones introducidas posteriormente. También será importante ver los distintos puntos conflictivos de la geometría del vehículo.



Imagen 7.1 [7] Cabeza tractora utilizada como modelo de referencia

Al realizar la simplificación del modelo para adaptarlo a la simulación en 2-D se distorsionarán los resultados, alejándolos de las propiedades aerodinámicas que encontramos en la realidad. En este caso, la eliminación de elementos como ruedas, guardabarros y la homogenización de los laterales del vehículo tendrán como resultado una forma más aerodinámica de lo que realmente es.

Aun así, esto no afecta al proyecto ya que éste es de carácter comparativo y la eficiencia de las mejoras implementadas se comparará siempre respecto al modelo base.

7.1. Resultados de la simulación

Se pasará a analizar los resultados de la simulación de la primera fase, empezando por datos como el CD y la fuerza de resistencia al avance.

Fase 1	De presión	De fricción	Total
Fuerza de arrastre (N)	2418,53	66,6	2485,15
CD	0,629	0,017	0,65

Tabla 7.1.1 Resultados numéricos de la primera simulación

Se obtiene un CD de 0,65 un valor bajo si lo comparamos con los datos que se obtienen normalmente con camiones de configuración parecida, esto es debido a las simplificaciones efectuadas. Se tomarán estos valores como referencia para la posterior comparativa de las siguientes fases.

7.2. Análisis gráfico de la simulación

Visualizar zonas de alta y baja presión ayudará a entender qué es lo que se opone al avance del vehículo. Como se puede ver en la figura 7.2.1, en la parte frontal de la cabeza tractora se encuentra una zona de altas presiones debido principalmente al choque inicial de las partículas contra el camión. También se puede apreciar una concentración de presiones altas a la izquierda del vehículo así como una menor presión en la parte posterior.

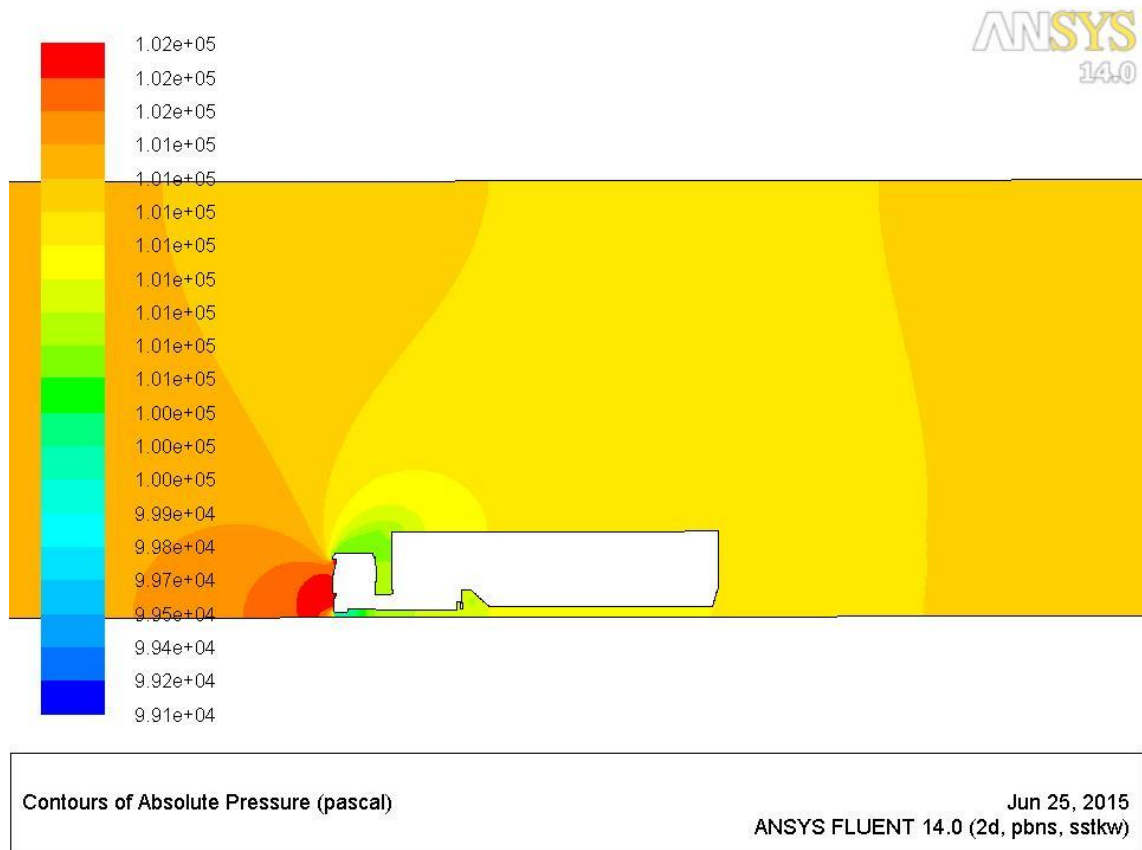


Figura 7.2.1. Contorno de presiones absolutas en el modelo de referencia

En una ampliación de la imagen se podrá ver con más detalle la distribución de presiones alrededor de la cabeza tractora. Además de la ya mencionada zona de altas presiones, se crean zonas donde las presiones son más bajas. En estas zonas este descenso de la presión es debido al aumento de velocidad del aire al pasar por las zonas superior e inferior de la cabina. Esto se puede ver en la siguiente figura.

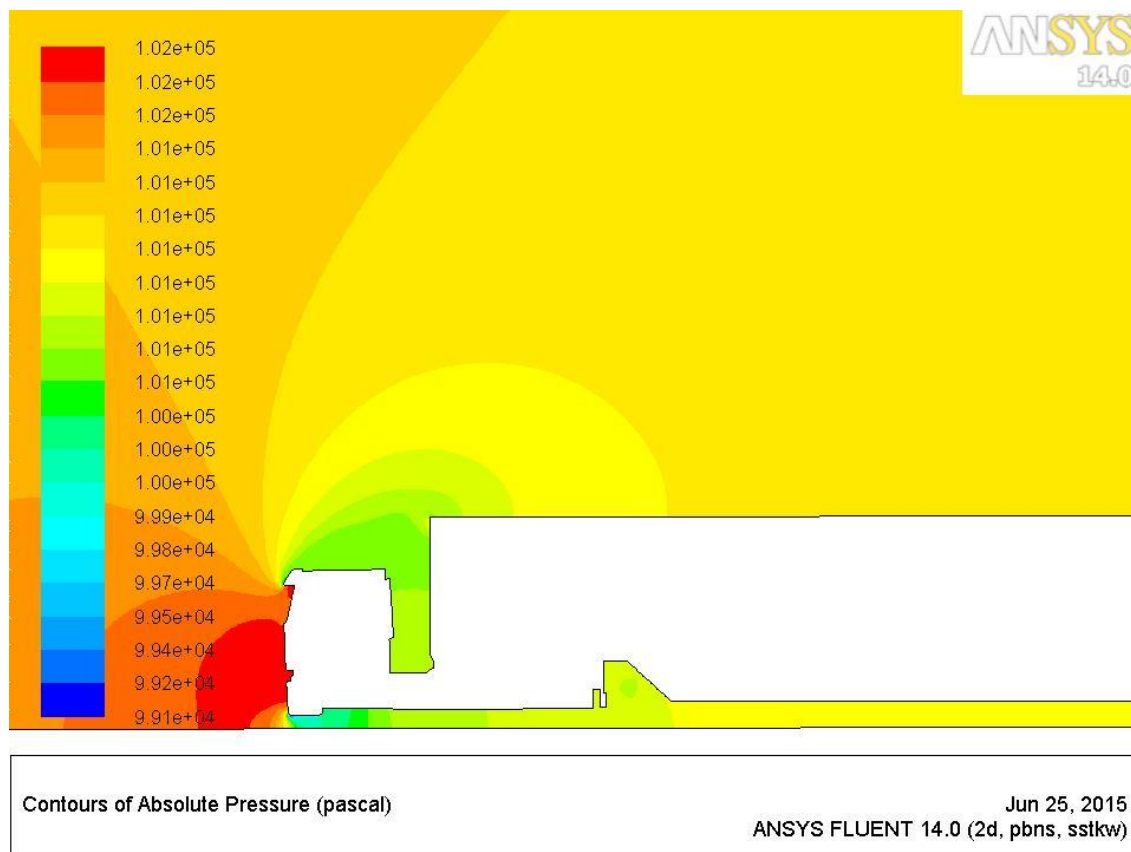


Figura 7.2.2. Detalle del contorno de presiones absolutas en el modelo de referencia

A continuación se visualizarán los vectores velocidad del flujo de aire para ver qué camino sigue el mismo.

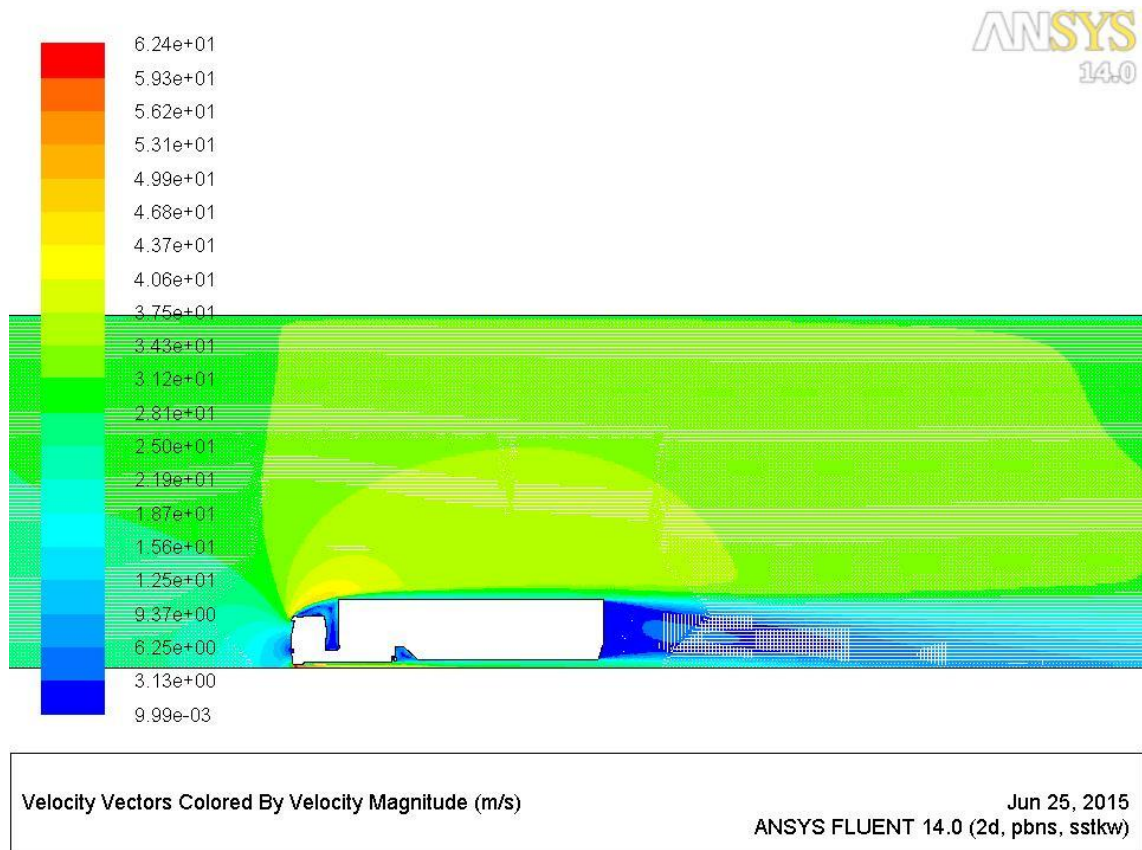


Figura 7.2.3. Vista general de los vectores velocidad en el modelo de referencia

De esta forma destaca de forma clara la existencia de una gran estela en la parte trasera del vehículo que se extiende a lo largo del túnel. La reducción de esta estela será uno de los objetivos en una de las siguientes fases del proyecto.

Otro de los puntos de interés es la unión entre cabina y caja, se analizará con más detalle esta zona.

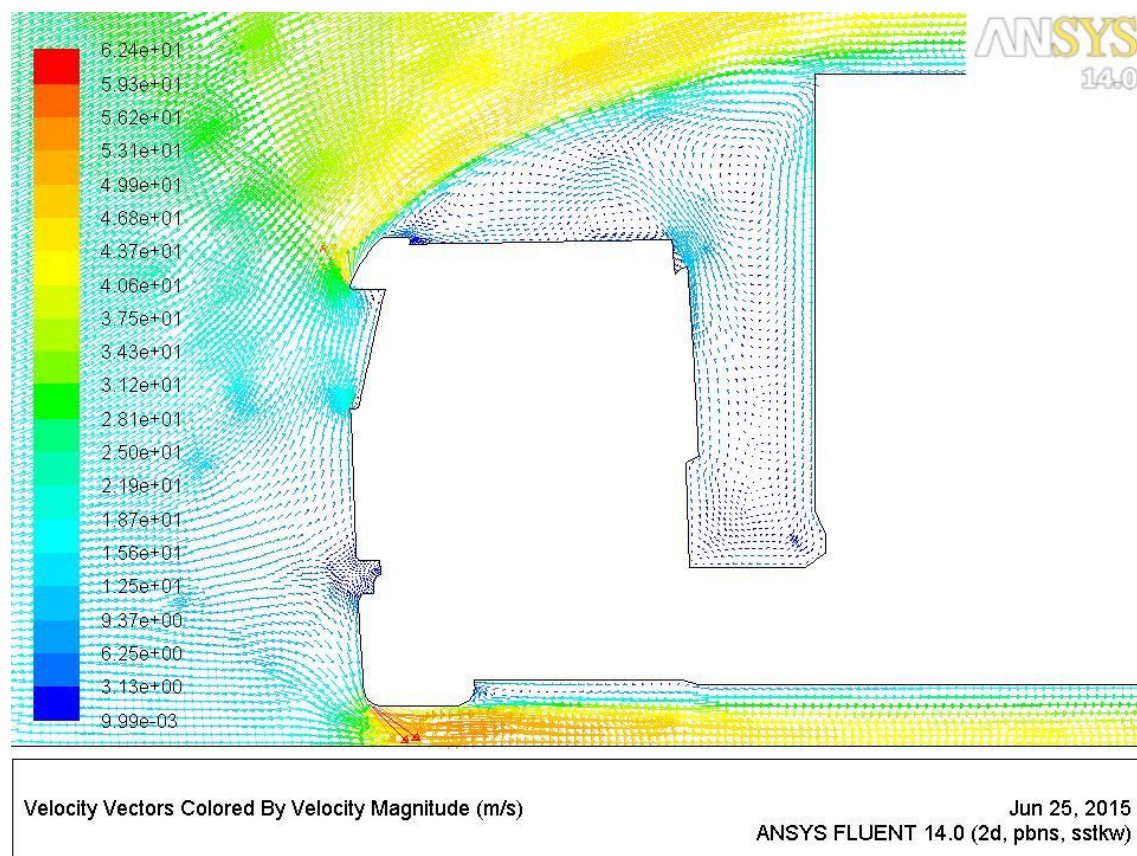


Figura 7.2.4. Detalle de los vectores velocidad alrededor de la cabina

En el espacio existente entre cabina y caja se puede ver la creación de turbulencias que penalizarán mucho la aerodinámica. De la misma forma se puede ver que parte del aire que había sido desviado en la parte frontal de la cabina vuelve a chocar contra la caja, aumentando la resistencia al avance. Esta es una zona de gran interés para los fabricantes de cabinas tractoras ya que la optimización de ésta puede beneficiar en gran medida la eficiencia del vehículo. En la siguiente figura se puede ver con más detalle esta zona.

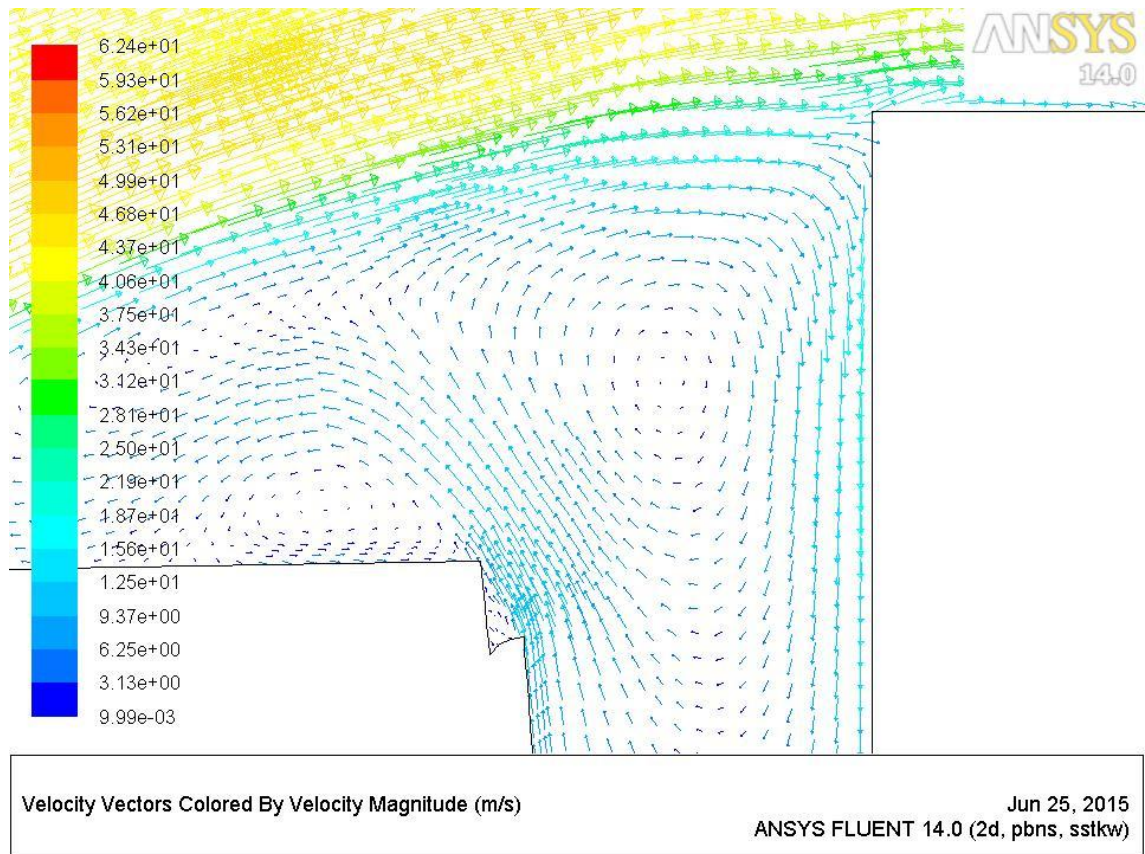
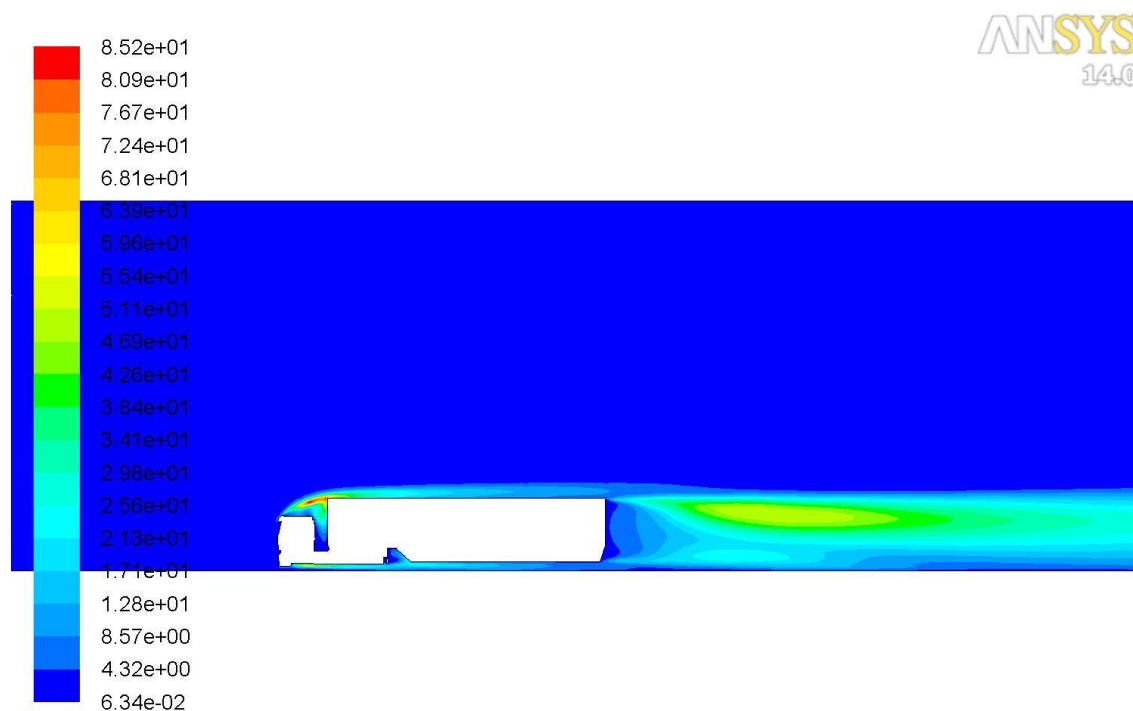


Figura 7.2.5. Detalle de los vectores velocidad entre cabina y caja.

Para ver con más claridad las zonas más conflictivas y las turbulencias creadas en las mismas, observaremos los gráficos que muestran la energía cinética de las turbulencias creadas alrededor del vehículo.



Contours of Turbulent Kinetic Energy (k) (m2/s2)

Jun 25, 2015
ANSYS FLUENT 14.0 (2d, pbns, sstk)

Figura 7.2.6. Contornos de la energía cinética de las turbulencias.

Las dos zonas antes comentadas se confirman como zonas críticas y sobre las cuales sería recomendable incorporar alguna solución. En la zona de la cabina se crean turbulencias de gran intensidad si bien éstas se dan en un área reducida. Por otra parte, en la estela del vehículo se crea una gran zona de turbulencias que, si bien no son tan intensas como las de la cabina, su gran extensión las hace igual de importantes.

8. Segunda Fase

En este apartado se estudiará el efecto que tiene la incorporación de un deflector en la parte superior de la cabina. Como se ha visto con anterioridad este área era una de las más conflictivas del modelo inicial.

8.1. Nuevo componente

El objetivo del deflector es desviar el flujo de aire que pasa por encima de la cabina para evitar la zona de turbulencias creadas en ese punto. Desviando el aire se evita la zona de choque contra la cabina que tanto afecta a la aerodinámica. La geometría del componente en cuestión será la geometría utilizada por el fabricante IVECO en sus modelos de cabezas tractoras, concretamente el utilizado en el modelo IVECO Stralis Euro 5. La geometría para la segunda fase será la siguiente:



Figura 8.1.1. Geometría utilizada para las simulaciones de la segunda fase.

8.2. Resultados de la simulación

Los resultados de la segunda simulación muestran una clara mejoría con el nuevo dispositivo. La fuerza de oposición se reduce en 791,7 N, aproximadamente un 30% menos de lo obtenido en el modelo base. De la misma forma el CD disminuye pasando de 0,65 a 0,45. En la siguiente tabla se pueden ver todos los datos.

Fase 2	De presión	De fricción	Total
Fuerza de arrastre (N)	1693,3	27,0	1720.3
CD	0,440	0.007	0,447

Tabla 8.2.1. Tabla de resultados de la segunda simulación

Para ver la magnitud de esta mejora se calcula la demanda de potencia exigida al motor con y sin el deflector. Para ello se calculará la potencia con la siguiente fórmula:

$$P = F \cdot v \quad (\text{Ec. 8.2.1})$$

Donde P es la potencia de frenado que realiza el aire sobre el vehículo y v es la velocidad relativa entre ambos. La velocidad se fijará en 27,78 m/s que equivale a 100 km/h; velocidad de uso habitual en camiones. Los valores de fuerza utilizados serán la fuerza total, teniendo en cuenta tanto la de fricción como la de presión.

De esta forma se obtienen los siguientes valores:

- Modelo de referencia: P=69,037 kW
- Modelo con deflector: P=47,786 kW

Esto supone un enorme beneficio económico ya que toda la potencia que no es requerida se traduce en combustible sin quemar reduciendo tanto las emisiones como el consumo de carburante. Es por esta razón que actualmente la mayoría de camiones a la venta incorporan esta solución aerodinámica.

8.3. Análisis gráfico de la simulación

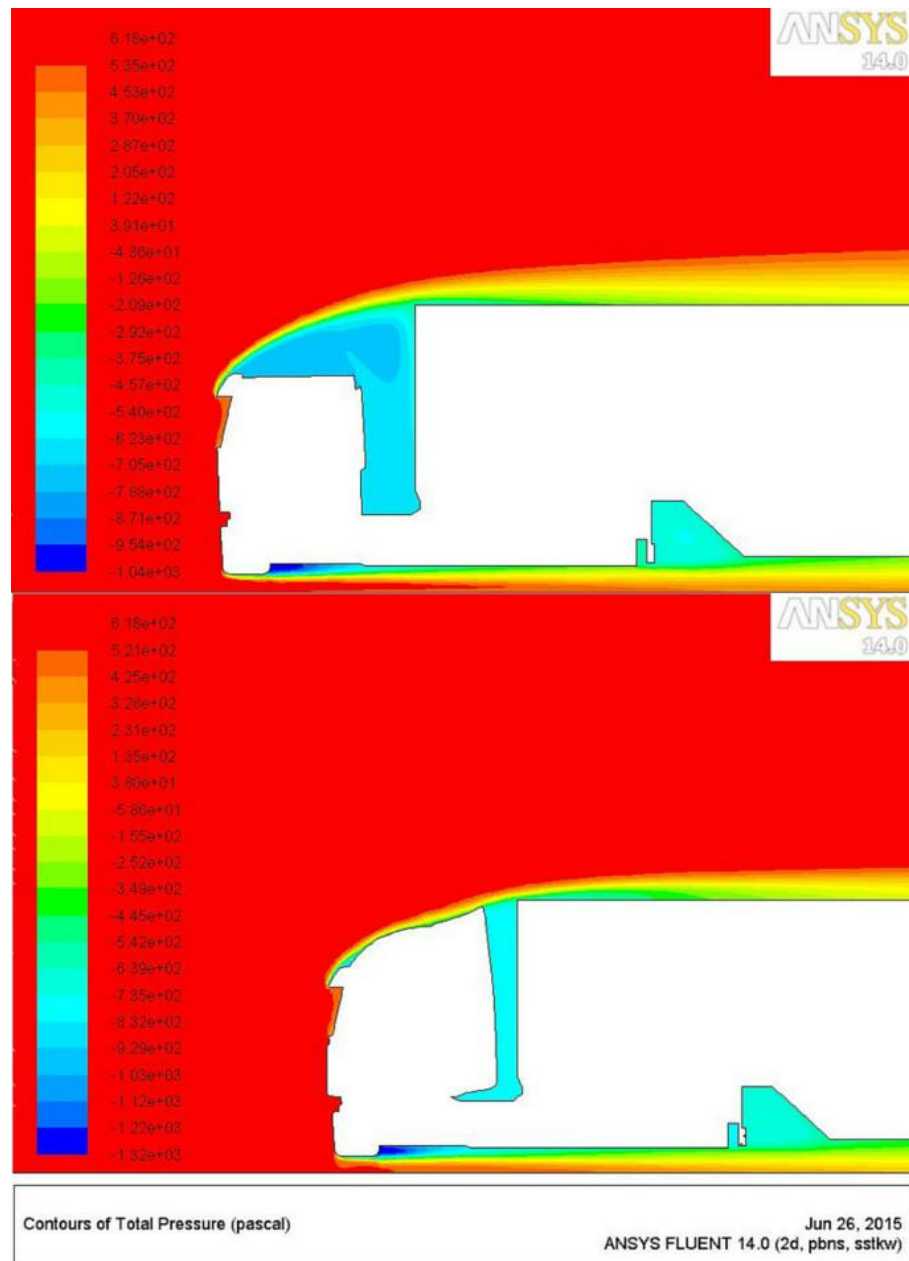


Figura 8.3.1. Comparativa de la presión total con y sin deflector

Los contornos de presión muestran una distribución de presiones más favorables gracias al uso del deflector. Se puede observar como los valores de presión de la zona son más altos cuando se utiliza el deflector, generando un gradiente de presiones menor.

No sólo se modifica el espacio entre cabina y caja si no que también se ve reflejado en la parte superior de la caja con una menor afectación en la distribución de presiones del fluido.

A continuación se analizarán los vectores de velocidad para entender como el aire es desviado por el deflector.

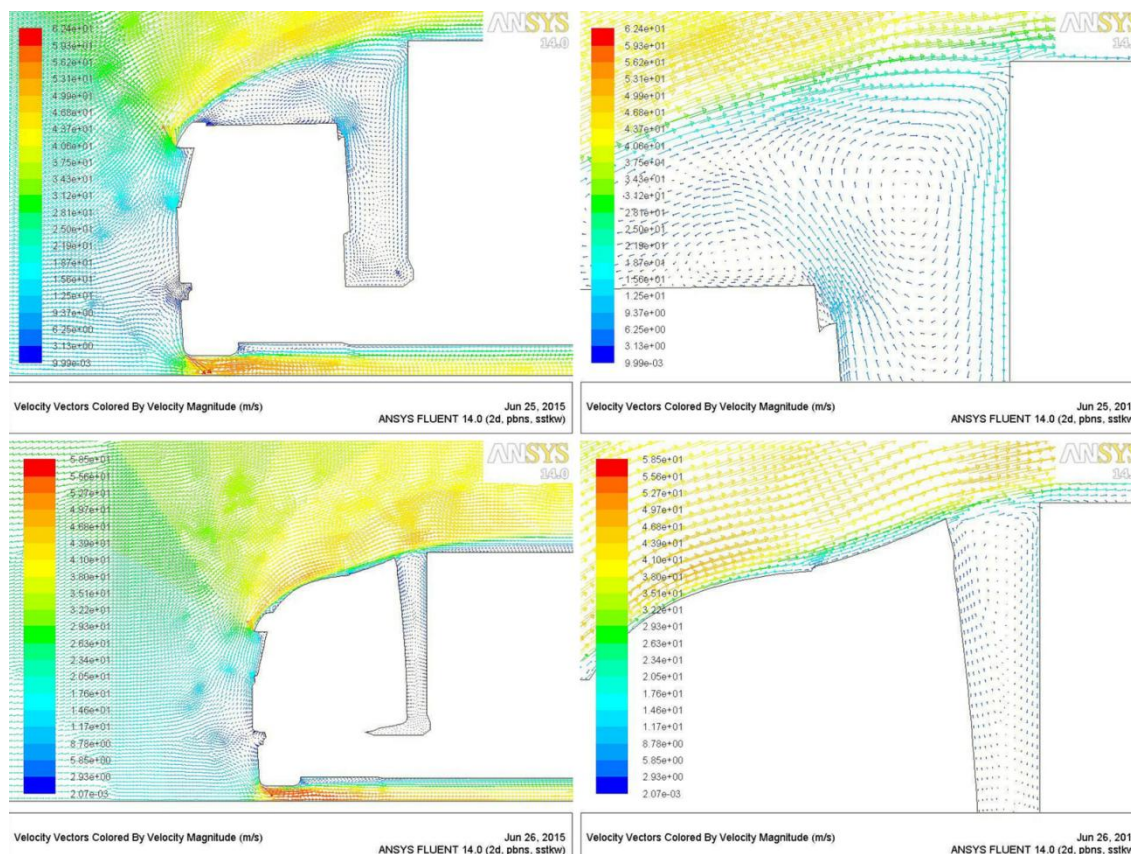


Figura 8.3.2. Comparativa de la trayectoria seguida por el aire con y sin deflector

Lo primero que se puede ver es la gran reducción de la zona de turbulencias, quedando reducida a una fina columna por la que no hay apenas circulación de aire. Otra de las cosas que se pueden observar es la reducción del valor de velocidad máxima del fluido reduciendo el valor desde los 64,4 m/s a 58,5 m/s. Así se consigue un flujo más uniforme reduciendo los cambios bruscos tanto de presión como de velocidad.

La zona de choque contra la caja del camión se elimina desviando el fluido por encima de la misma, evitando así una posible zona de alta resistencia debido a fuerzas de presión.

9. Tercera fase

9.1. Introducción

Como se pudo ver en el estudio del modelo de referencia, existían dos zonas críticas en el diseño. La primera de ellas era la ya optimizada en la fase 2; la parte superior de la cabina. Una vez solventada esta parte, se propondrá una solución para intentar mejorar la segunda zona; la parte trasera del camión.

Recordemos que en esta parte se creaba una gran estela que se extendía casi hasta el final del túnel de viento simulado. Esta estela es muy perjudicial ya que se crea una zona de succión que se opone al avance del vehículo.

Para reducir esta zona se presentaban varias alternativas, cada una con ventajas e inconvenientes. Se repasarán varias de ellas para decidir cual implementar finalmente.

9.2. Alternativas propuestas

9.2.1. Extensión del marco trasero

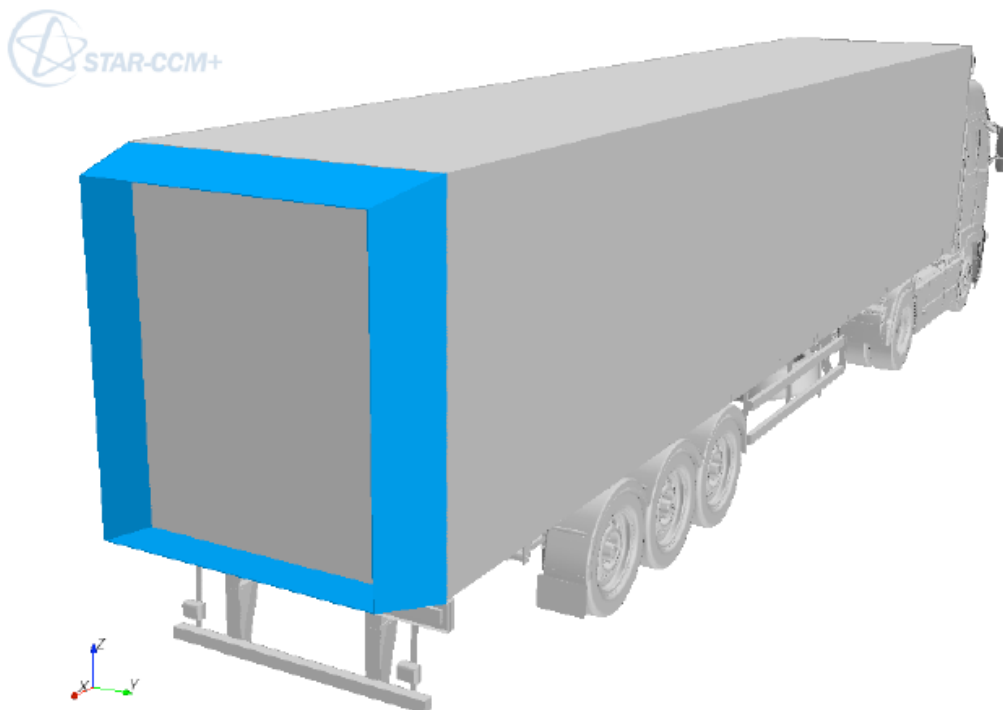


Figura 9.2.1.1. [8] Representación de la extensión del marco trasero del remolque

Estas extensiones buscan que el flujo se adhiera a ellas reduciendo el área de la sección inicial de la estela. Así se consigue una estela más estrecha y menos perjudicial. Además se aumenta el valor de presión en la zona trasera del tráiler, reduciendo la succión tal y como se puede ver en la siguiente figura.

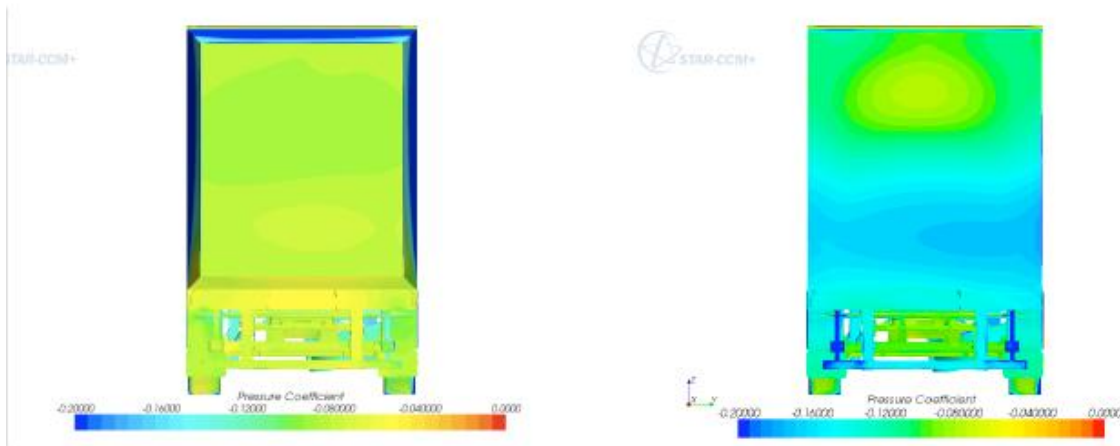


Figura 9.2.1.1.[8] Coeficientes de presión en la parte trasera con y sin el marco

A la izquierda se puede ver una simulación utilizando el dispositivo en la que los valores del coeficiente de presión son de aproximadamente $-0,08$. A la derecha, el modelo de referencia con un valor de $-0,14$. Se confirma así la reducción de la succión en esta zona.

Una de las desventajas de la utilización de este sistema es la reducción de la boca de carga del remolque. Esto no es recomendable ya que puede dificultar la entrada de la carga en la caja. Además, estas extensiones se pueden romper con facilidad si se tiene en cuenta la masa y el volumen de los objetos a cargar.

9.2.2. Techo del remolque en forma de gota

Otra opción es modificar la forma del techo del remolque haciéndolo más aerodinámico. El efecto conseguido sería el siguiente:



Figura 9.2.2.1.[9] Trayectoria seguida por el aire alrededor de este tipo de remolque

Como se puede ver en la imagen, la estela dejada por el paso del vehículo es mucho menor a la que se genera en el modelo de referencia.

Por otro lado, este diseño tiene ciertas desventajas. La altura de la caja es variable a lo largo del eje longitudinal del camión. Esto se traduce en un espacio de carga no constante a lo largo del remolque. De esta forma se dificulta la tarea de distribuir la carga en el remolque debido a las distintas limitaciones de altura.

Otra desventaja no menos importante es que aunque la altura máxima sigue siendo la misma, la altura de la boca de entrada es menor limitando así la altura máxima de objetos a cargar. Además hemos de tener en cuenta que para circular con normalidad ha de cumplirse la normativa europea que limita la altura máxima de este tipo de vehículos. Si se busca hacer la forma más aerodinámica posible ésta se hará a costa de reducir el volumen de carga disponible. Esto es una gran desventaja ya que el objetivo principal de estos camiones es poder transportar la máxima carga posible.

9.2.3. Desviador de flujo

Como última opción se propone un dispositivo que desvíe el flujo de aire que circula por encima del remolque, para hacerlo entrar en la zona de la estela haciéndola más débil y menos perjudicial. El dispositivo sería algo parecido al que se ve en la siguiente figura.

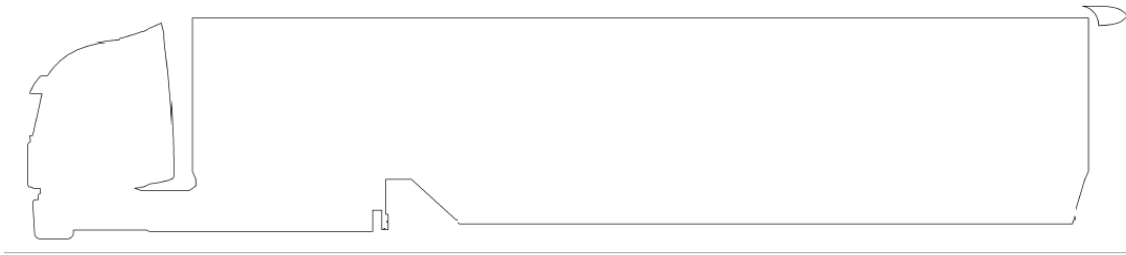


Figura 9.2.3.1. Geometría con el dispositivo instalado

Este dispositivo tiene la ventaja de no afectar en exceso la carga del camión. Al estar situado sólo en la parte alta del remolque no estrecha la boca de carga. A diferencia del techo con forma de gota, esta solución no afecta al volumen de carga del vehículo.

Por estas razones se elige esta última opción para diseñarla, optimizarla y evaluar su funcionamiento.

9.3. Desarrollo de la alternativa seleccionada

El diseño preliminar tenía como objetivo ver si se conseguía el efecto deseado aunque la geometría no fuera óptima. A partir de ahí se sucederán varias iteraciones para intentar mejorar la eficiencia. El diseño inicial es el siguiente:

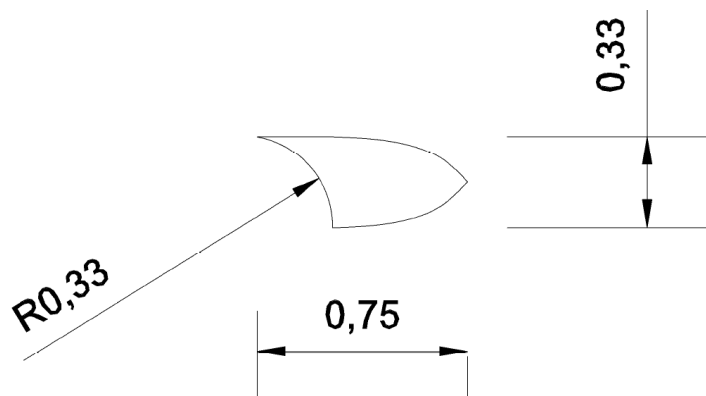


Figura 9.3.1. Geometría inicial del apéndice

La parte frontal del elemento es la encargada de desviar la trayectoria del fluido desviándolo así hacia la zona de la estela. La parte superior intenta que el aire que pase por encima de la misma se adhiera para reducir la estela producida por el propio dispositivo.

Al incorporarlo al vehículo se obtienen los siguientes gráficos que darán una idea de si el funcionamiento está siendo el esperado.

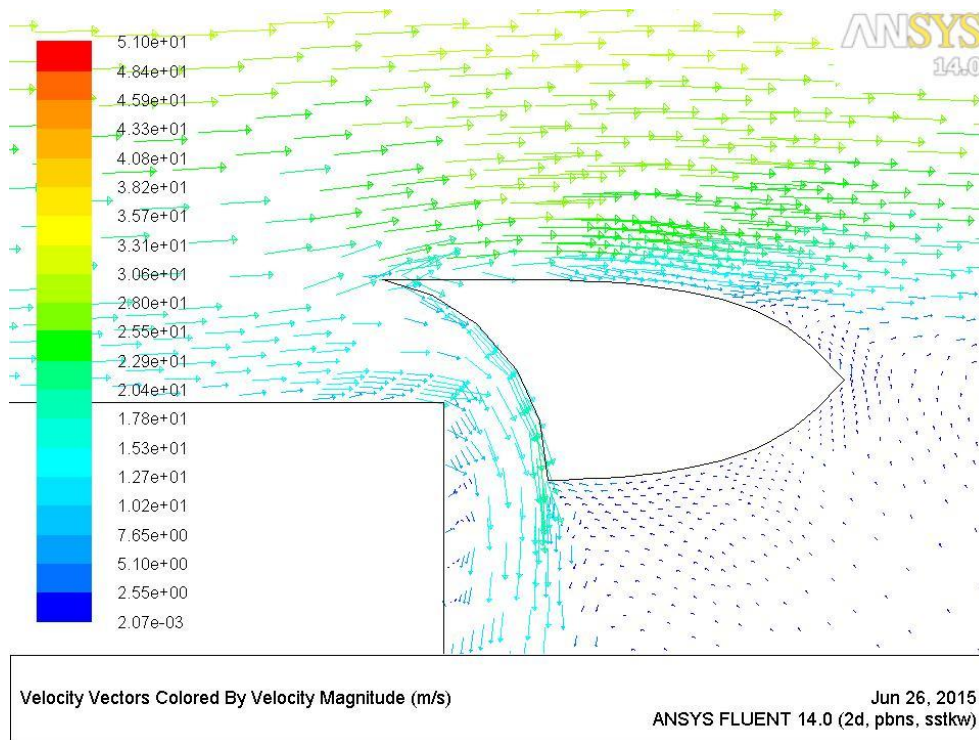


Figura 9.3.2. Vectores de velocidad alrededor del desviador

Se puede ver como se consigue desviar el fluido introduciéndolo de forma satisfactoria en la zona de la estela. Por otra parte también se puede ver que el flujo se desprende en la parte trasera del apéndice, algo no deseable.

Las dimensiones del apéndice se consideran excesivas ya que mide 75 centímetros de largo y 33 centímetros de alto. Para la siguiente iteración se proponen modelos más compactos que sigan consiguiendo el mismo propósito.

El siguiente modelo que se propuso presentaba la geometría representada a continuación:

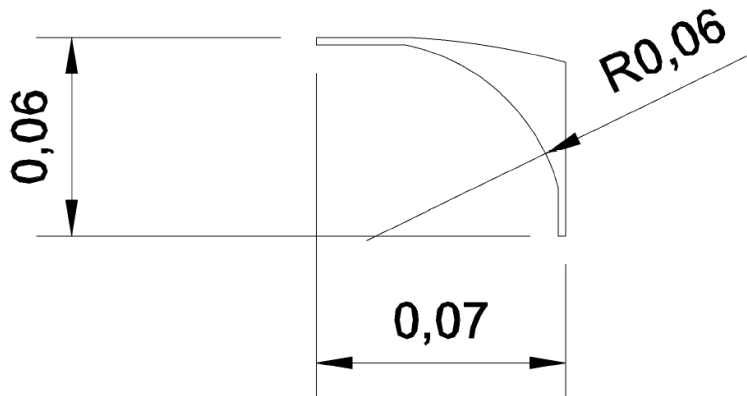


Figura 9.3.3. Nueva geometría, más compacta

Esta opción es mucho más compacta pasando de los 75 cm de longitud a tan solo 7 cm. La altura se reduce de la misma forma. Este diseño presentó problemas para simularlo ya que la discretización del túnel de viento no tenía la suficiente resolución. Esto significaba que al discretizar esta zona el elemento desaparecía o quedaba muy distorsionado debido al gran tamaño de los elementos utilizados.

Una solución a este problema podía ser el refinado de la malla alrededor del elemento pero debido a limitaciones del ordenador donde se estaban realizando las simulaciones no fue posible hacerlo.

La solución fue aumentar el tamaño del apéndice hasta que tuviera el tamaño suficiente como para que al discretizar no se viera muy distorsionado. De esta forma se obtuvieron los siguientes modelos:

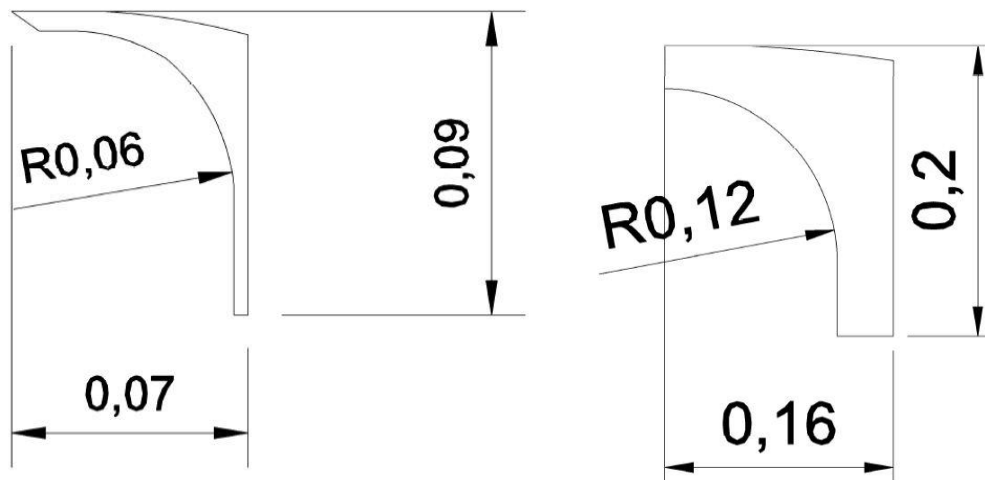


Figura 9.3.4. Diferentes modelos probados

Finalmente se eligió el modelo definitivo con la siguiente geometría:

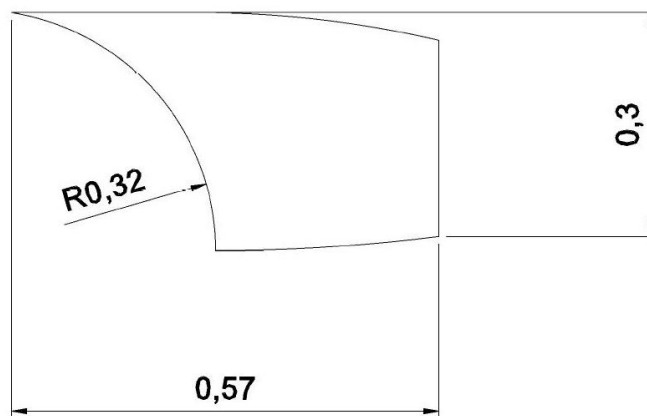


Figura 9.3.5. Geometría definitiva

Este último era el único que permitía hacer un mallado que asegurase la convergencia de la solución dadas las limitaciones del ordenador. Así la longitud se reduce en 18 centímetros respecto al modelo base. Se ha prescindido la parte final del apéndice ya que ésta no presentaba ninguna clara ventaja debido a que el flujo se desprendía antes de llegar a ese punto.

De esta forma, el vehículo con el desviador instalado presentará la siguiente geometría.

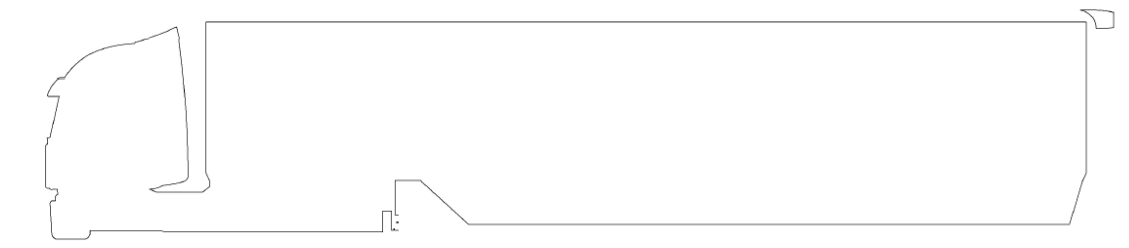


Figura 9.3.5. Geometría definitiva

9.4. Resultados de la simulación

Los resultados de la simulación con el dispositivo muestran una clara mejora como se puede ver en la siguiente tabla:

Fase 3	De presión	De fricción	Total
Fuerza de arrastre (N)	1231,92	23,42	1255,34
CD	0,372	0,007	0,38

Tabla 9.4.1 Resultados numéricos de la simulación

Estos valores presentan una clara mejoría respecto a los obtenidos con el uso del deflector y esta diferencia es aún mayor si se compara con el modelo de referencia. A continuación se verá cómo trabaja el apéndice.

9.5. Análisis gráfico de la simulación

Para entender el por qué de esta mejora se utilizarán gráficos para comparar respecto a la referencia. Se empezará viendo la zona de turbulencias.

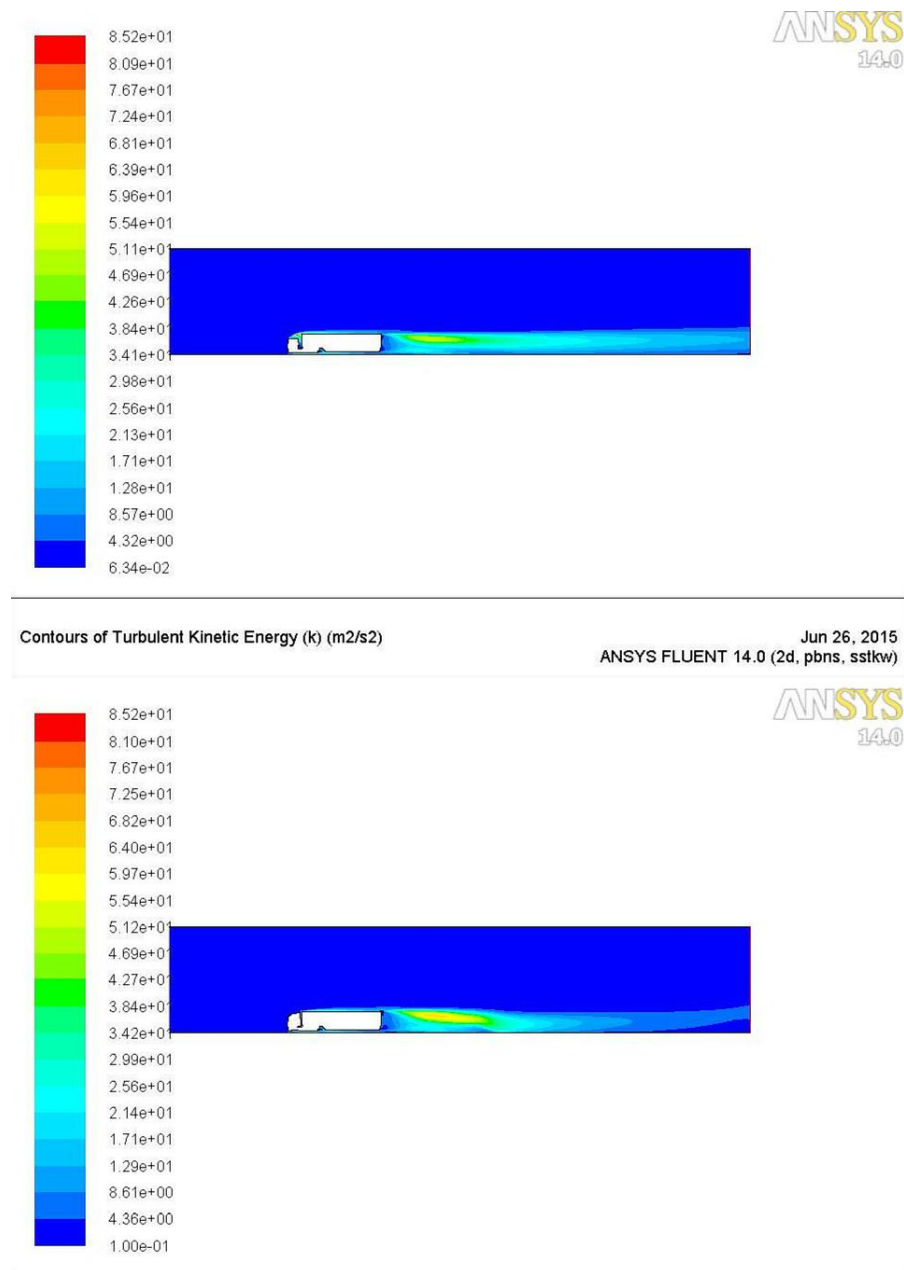


Figura 9.5.1 Comparativa de los contornos de energía cinética de las turbulencias

Se puede ver que en la parte trasera se genera una zona de turbulencias más intensa que anteriormente debido al choque del aire con el nuevo elemento. Este hecho se podría evitar reduciendo el tamaño del apéndice pero ha sido imposible por las razones ya mencionadas.

Aun así, se puede ver cómo las turbulencias se debilitan mucho más rápidamente en la zona final del túnel, hecho que mejora la eficiencia aerodinámica general del vehículo.

A continuación se muestra con más detalle cómo está funcionando.

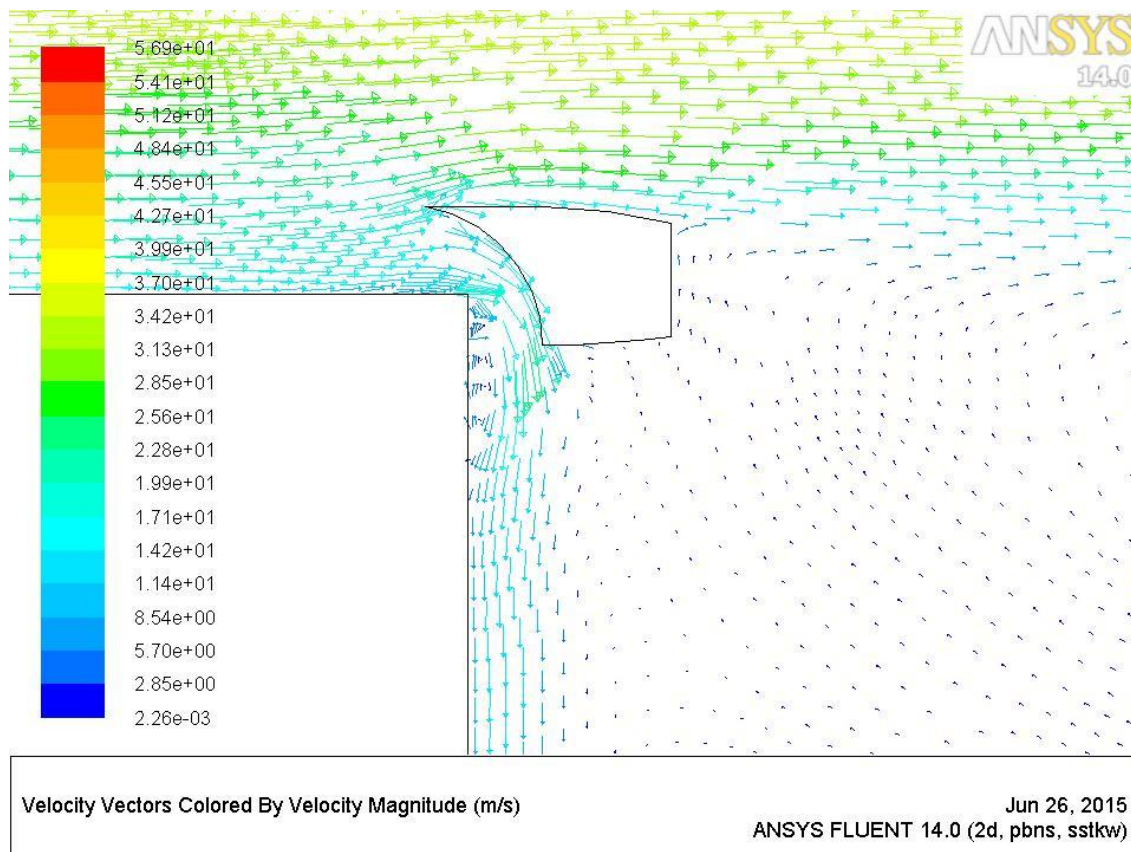


Figura 9.5.2 Vectores de velocidad

El flujo es desviado de forma satisfactoria hacia la parte trasera de la caja introduciendo más partículas de aire en esta zona que luego serán las que hagan desaparecer la turbulencia con mayor rapidez. Se puede ver también que el aire sale vertical hacia el asfalto habiendo girado noventa grados su trayectoria. Para futuras iteraciones se podría comprobar si realmente es necesario desviar tanto el flujo.

Cuanto más se desvíe la trayectoria del aire que circula por encima del remolque más fuerza ejercerá el aire en este punto. Inicialmente el aire tiene velocidad casi horizontal, en cambio una vez pasado por el desviador la velocidad se puede considerar vertical. Toda la potencia que se necesita para frenar la velocidad horizontal del aire hasta llegar a cero la proporciona el apéndice. Por eso es conveniente asegurarse de que se frena el aire lo necesario como para que haga desaparecer las turbulencias, todo lo que trabaje de más se traducirá en pérdidas aerodinámicas.

También se puede observar que, al contrario de lo que pasaba con el modelo inicial, el flujo que recorre el apéndice por la parte superior no se desprende hasta llegar al final del mismo.

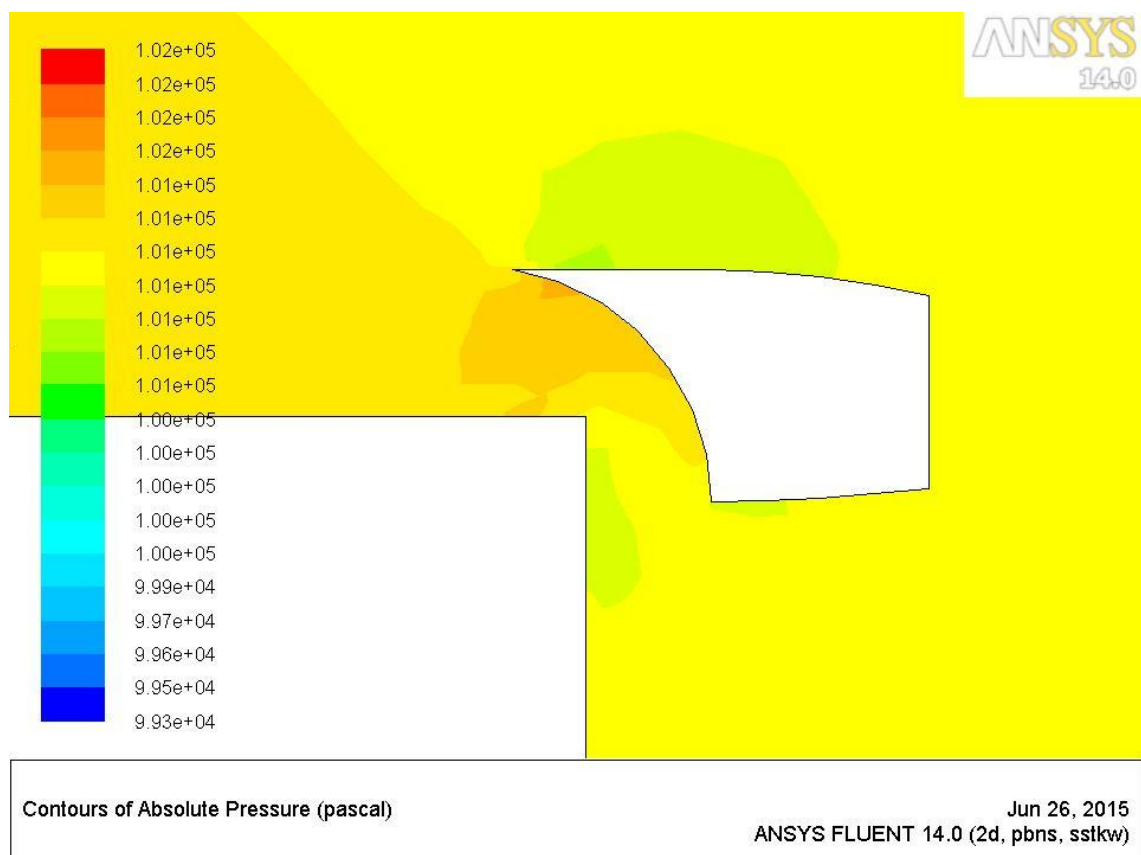


Figura 9.5.2 Contornos de presiones absolutas

Si se presta atención a la distribución de presiones que hay alrededor del elemento se podrá ver como el aire genera resistencia al chocar. Como se ha comentado anteriormente, el elemento tiene que frenar el aire en la dirección horizontal. Una posible forma de reducir este fenómeno sería aumentar la distancia entre la esquina de la caja y el apéndice para reducir el estrangulamiento del fluido en ese punto.

10. Sumario de las simulaciones

El siguiente gráfico recoge los resultados del coeficiente aerodinámico en las tres simulaciones.

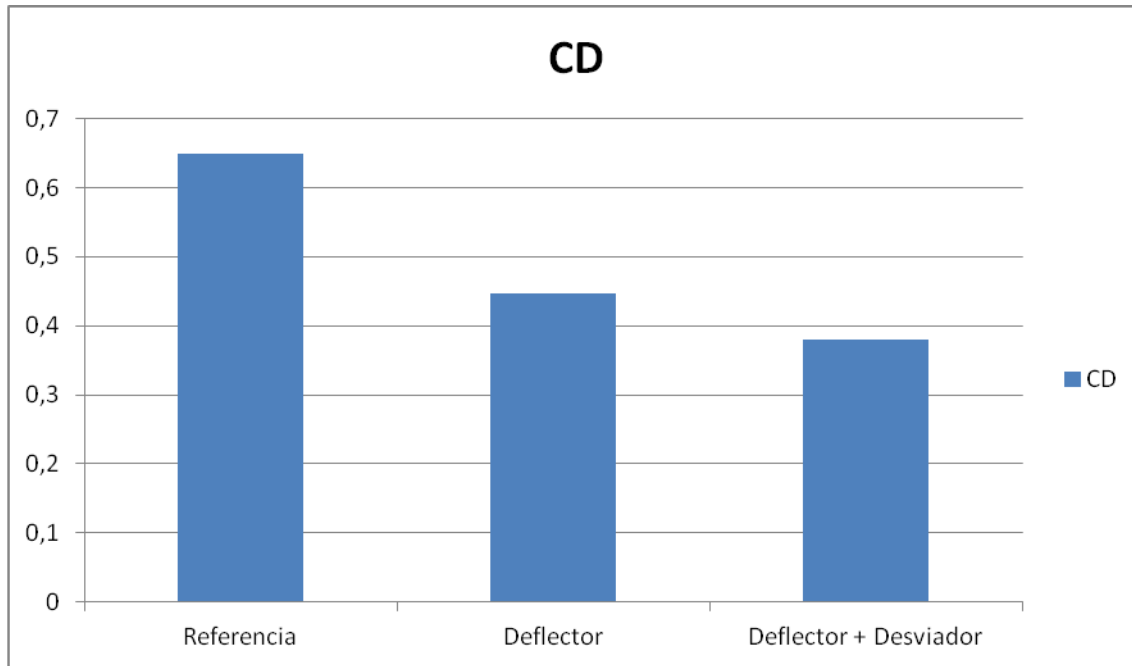


Gráfico 10.1 Valores de CD para las diferentes fases

10.1. Discusión de resultados

Las dos soluciones puestas a prueba durante las simulaciones han dado el resultado esperado. La primera, el deflector, ha confirmado las bondades por las cuales la mayoría de los camiones de la actualidad lo incorporan. Con una reducción de un 30% en el coeficiente aerodinámico, la mejora es notable.

La segunda solución evaluada ha tenido resultados positivos como se puede ver en el gráfico 10.1 reduciendo el valor un 10% adicional. Esta parte tenía como objetivo mejorar la parte trasera del tráiler. Los resultados reflejan que se ha conseguido aunque también muestran la aparición de una fuerza de resistencia al avance sobre el nuevo elemento. Aun así el balance global es positivo.

Sería recomendable seguir realizando diferentes iteraciones con diferentes variantes del desviador para así optimizar su eficacia. Hay que recordar que debido a dificultades con el mallado no se le ha podido dar la forma deseada.

En la actualidad ganar un 2% de rendimiento aerodinámico en un vehículo de estas características es realmente complicado. Sin embargo, durante el transcurso de este proyecto hemos podido ver mejoras de hasta el 30 %. Esto es así por varias razones, siendo la primera de ellas que el modelo en 2-D reproduce de forma poco fiable los resultados que se esperarían en la realidad. Además se tomó como modelo de referencia un modelo de camión muy básico el cual no incorporaba deflector en la cabina, elemento extensamente utilizado en la actualidad.

Hay que tener en cuenta que las soluciones de las simulaciones CFD son una aproximación de los resultados que se obtendrían realmente. Los cálculos son hechos a partir de una serie de supuestos que se realizan con el objetivo de resolver las ecuaciones del flujo. De todas formas, para todos los casos tratados en el proyecto se han asumido las mismas simplificaciones y los errores deberían ser parecidos para todos ellos.

Las mejoras aerodinámicas serán más pequeñas conforme más óptimo sea el vehículo de partida. Los fabricantes de camiones llevan años intentando mejorar sus modelos para hacerlos lo más eficientes posibles aunque esta tarea sea cada vez más complicada.

Si se presta atención a los resultados de la segunda simulación se puede ver como hay muy poco margen de maniobra para mejorar la aerodinámica en esa zona.

Llegados a este punto, la siguiente opción de mejora es el remolque. Esta zona es muy susceptible a cambios de forma ya que estos están diseñados en su mayoría para poder transportar la máxima carga como objetivo fundamental. Si se tienen en cuenta las normativas que limitan las cotas máximas de vehículos se obtendrá como resultado una zona difícil de modificar.

Se ha llegado a la conclusión de que lo óptimo para mejorar la aerodinámica general sería que los mismos fabricantes de cabezas tractoras diseñaran un remolque asociado a las mismas. De esta forma se maximizarían las cualidades de ambas partes haciéndolas trabajar como un conjunto.

11. Presupuesto

Debido a las características del proyecto, el coste es debido a investigación y desarrollo de los componentes. Dentro de presupuesto se tendrán en cuenta los costes de las licencias del software utilizado, en este caso Ansys y Autocad. Por otra parte se tendrá en cuenta el coste de los recursos humanos consumidos ya sean en forma de instalación de software cómo el tiempo invertido tanto en el diseño de geometrías como en la realización de las distintas simulaciones.

El coste de “Ansys Academic Research License & Dowload” es de 220\$ [10] que equivalen a 197,46€. Por otra parte, una subscripción para obtener la licencia de Autocad durante un año tiene un coste de 360€ [11]. El valor del salario anual de un Ingeniero se ha determinado según las tablas salariales establecidas por C.C.O.O. en las cuales consta un salario de 26.057,09€ anuales repartidos en 14 pagas [12]. La duración del proyecto ha sido de cuatro meses aunque la horas invertidas diariamente no llegaban a las 8 horas laborales de una jornada completa. Es por esta razón que para realizar el coste salarial del proyecto se ha estimado que las horas invertidas equivaldrían a tres meses trabajando a jornada completa.

El ordenador y hardware utilizado para realizar las simulaciones tienen un coste aproximado de 600€, si tenemos en cuenta que tienen una vida útil de 5 años y que se ha utilizado durante 3 meses el coste asociado será de 30€. De la misma forma, si tenemos en cuenta la necesidad de conexión a internet para realizar el trabajo de investigación, se deberá añadir el coste de la conexión a internet. Si se tiene en cuenta que esto comporta un coste de 55€ mensuales, el coste total de este concepto será de 165€. En la siguiente tabla se puede ver el desglose de forma detallada.

CONCEPTO	COSTE ANUAL	UNIDADES (AÑOS)	COSTE
Licencia Ansys	197,46€	1	197,46€
Licencia Autocad	360€	1	360€
Salario Ingeniero	26.057,09€	3/14	5583,66€
Hardware	120€	3/12	30€
Conexión a internet	660€	3/12	165€
Total			6336,12 €

Tabla 11.1 Desglose de costes

12. Impacto ambiental

Para realizar el estudio del impacto ambiental cabe recordar que este proyecto cubre la etapa de estudio y desarrollo de los componentes. Es por esta razón que no se estudiará el efecto que causaría la utilización del elemento diseñado en la última fase del proyecto así como posibles problemas de reciclabilidad del material utilizado en su construcción.

Para la realización de este trabajo se ha utilizado principalmente un ordenador, por lo que se debe tener en cuenta el consumo energético del mismo así como la posibilidad de que algunos de sus componentes se deterioren y se deban sustituir. En el caso de que la energía eléctrica se haya obtenido mediante energías renovables, la huella ecológica dejada por el ordenador sería nula. Afortunadamente no hubo que adquirir ningún recambio así que no se tuvo que tener en cuenta la reciclabilidad de los componentes del ordenador.

Se realizará la entrega del depósito mediante el campus virtual de la universidad reduciendo así el uso de material como CD-ROMs para reducir al máximo el impacto ambiental. Asimismo, el trabajo de impresión se realizará por las dos caras del papel por la misma razón.

Conclusiones

Este trabajo verifica el por qué de las mejoras aerodinámicas hechas en camiones y comprueba que aún existe potencial por explotar en este campo.

La aerodinámica gana protagonismo cuando lo que se busca es reducir los costes de utilización de este tipo de vehículos. También se ha de tener en cuenta las limitaciones en forma de normativa a las que se enfrentan tanto los fabricantes de camiones como los fabricantes de remolques.

En cuanto a los elementos aerodinámicos probados, se ha confirmado que con todos ellos la aerodinámica mejora. Si bien se ha podido ver que la parte con más potencial por aprovechar es la zona del tráiler.

Las soluciones que modifican la forma de la caja no son recomendables, ya que mediante el uso de diferentes apéndices se puede lograr una mejora similar sin sacrificar en exceso el espacio de carga del camión.

Se acaba concluyendo que para una óptima configuración del vehículo es necesario que la cabeza tractora y la caja trabajen conjuntamente conduciendo el flujo de aire alrededor suyo. Para esto es necesaria una buena comunicación entre los fabricantes de camiones y los fabricantes de remolques, garantizando una buena integración de los dos componentes.

Una de las posibles mejoras para la realización de las simulaciones sería la utilización de modelos en tres dimensiones (3-D). De esta forma los resultados se asemejarían más a los que se obtendrían en la realidad. Sin embargo, el hecho de realizar el modelo en 3-D habría aumentado en gran medida la dificultad de modelado debido a la complejidad intrínseca en la geometría. De la misma forma aumentaría la demanda de recursos al ordenador, haciendo el proceso más largo y costoso.

Recomendaciones

Para continuar este trabajo desde aquí en adelante se deberían probar diferentes geometrías tanto de deflector como del desviador para hacerlos trabajar en conjunto y así mejorar aún más la eficiencia. De la misma forma, sería de interés intentar mejorar la aerodinámica en la parte inferior tanto de la cabina como del remolque.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] NRC-CNRC, Technical Report, Review of Aerodynamic Drag Reduction Devices for Heavy Trucks and Buses, *Ottawa, Ontario*
- [2] Factors Affecting Truck Fuel Economy, section nine. Goodyear.
- [3] Frank M. White, Mecánica de Fluidos, sexta edición. Aravaca, Madrid, 2008.
- [4] Buch 24

[<http://www.buch24.de/shopdirekt.cgi?id=2655298&p=3&sid=8&static=0&type=QUE901228>, 16 de Mayo de 2015]
- [5] Ansys Meshing User's Guide. Canonsburg, November 2013.
- [6] Dirección General de Tráfico, Reglamentación sobre vehículos pesados, edición 2013. Madrid, 2013
- [7] Mecalux Logismarket,

[http://www.logismarket.co.uk/commercial-vehicles/new-stralis_iveco_p, 3 de Mayo de 2015]
- [8] Christopher Hakansson, CFD Analysis of Aerodynamic Trailer Devices for Drag Reduction of Heavy Duty Trucks, Sweden, 2010.
- [9] Ecomodder

[<http://ecomodder.com/forum/showthread.php/more-aerodynamic-class-c-sleeper-angled-roof-29681.html>, 2 de Junio de 2015]
- [10] WebStore University of Illinois

[<https://webstore.illinois.edu/Shop/product.aspx?zpid=2181>, 15 de Junio de 2015]



[11] Autodesk Tienda online

[http://store.autodesk.es/store/adsk/es_ES/html/pbPage.NamerPid?mktvar004=ilt_wwm_emea_es_nc____TopSell_1&s_tnt=62208:2:0, 15 de junio de 2015]

[12] Convenio colectivo de la industria, C.C.O.O.

[http://industriamadrid.ccoo.es/comunes/recursos/99888/doc187587_Tablas_salariales_2014_y_tablas_transitorias._Convenio_de_la_Industria,_Servicios_e_Instalaciones_del_Metal_de_la_Comunidad_de_Madrid.pdf, 15 de junio de 2015]

[13] WebStore University of Illinois

[<https://webstore.illinois.edu/Shop/product.aspx?zpid=2181>]

Bibliografía complementaria

- Toward Heavy Truck Fuel Efficiency Using CFD, Taiwan 2014.
- Diario oficial de la Unión Europea, reglamento Nº 1230/2012, 12 de diciembre de 2012.
- IVECO HI-DESIGN & AERODYNAMICS

[<http://www.iveco.com/spain/producto/pages/nuevo-stralis-hi-design-aerodynamics.aspx>, 15 de abril de 2015]
- Volvo Trucks USA – Aerodynamics

[<http://www.volvotrucks.com/trucks/na/en-us/products/vnl/Pages/Aerodynamics.aspx>, 23 de abril de 2015]